



①⑨ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ Patentschrift
⑩ DE 43 08 373 C 2

⑳ Aktenzeichen: P 43 08 373.0-35
㉔ Anmeldetag: 16. 3. 93
㉕ Offenlegungstag: 22. 9. 94
㉖ Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 13. 4. 95

⑥① Int. Cl.⁶:
G 01 S 13/10
G 01 S 15/10
G 01 S 7/292
G 01 S 15/93
G 01 F 23/28
G 01 B 17/00
G 01 D 1/16
B 65 D 90/48

DE 43 08 373 C 2

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

⑦③ Patentinhaber:
Siemens AG, 80333 München, DE

⑦② Erfinder:
Kroemer, Nils, Dr.-Ing., O-9270 Hohenstein-Ernstthal,
DE; Vossiek, Martin, Dipl.-Ing., 4700 Hamm, DE;
Eccardt, Peter-Christian, Dipl.-Ing., 8012 Ottobrunn,
DE; Magori, Valentin, Dipl.-Phys., 8000 München, DE

⑥⑥ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit
in Betracht gezogene Druckschriften:

DE 33 37 690 C2
DE 38 21 577 A1
US 51 57 639
US 50 60 205
US 49 92 998
EP 04 59 336 A1

MAGORI, V., WALKER, H.: Ultrasonic Presence
Sensors with Wide Range and High Local
Resolution. In: IEEE Trans. on Ultrasonics,
Ferroelectrics and Frequency Control, 1987, Nr. 2,
S. 202-211;

⑥④ Verfahren zur Erkennung und Separation von Nutz- und Störschalls im Empfangssignal von
Abstandssensoren, welche nach dem Impuls-Echo-Prinzip arbeiten

DE 43 08 373 C 2

Beschreibung

Die Erfindung betrifft Ultraschall-Abstandssensoren auf der Basis des Impuls-Echo-Verfahrens mit erhöhter Meßsicherheit und verbesserter Unterdrückung von Störechosignalen. Bedeutende Applikationsgebiete sind die berührungslose Distanzmessung für die Positionierung von Werkstücken, der Kollisionsschutz oder die Füllstandsmeßtechnik.

Bekannt sind Ultraschall-Sensoren, welche den Abstand zwischen dem Sensor und einem schallreflektierenden Objekt durch die Messung der Laufzeit eines Schallsignals vom Sensor zum Objekt und zurück bestimmen. Hierbei wird das Echo üblicherweise dadurch erfaßt, daß das Überschreiten eines vorgegebenen Schwellwertes im Empfangssignal ausgewertet wird. Dieses Verfahren zur Abstandsmessung wertet üblicherweise die Laufzeit des ersten detektierten Echos aus. Eventuell folgende Echos von anderen im Erfassungsbereich des Sensors liegenden Objekten werden hingegen nicht weiterverarbeitet. Durch eine Zeitfenstersteuerung nach Mágori, V.; Walker, H.: Ultrasonic Presence Sensors with Wide Range and High Local Resolution. IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, UFFC-34, No. 2, Mar. 1987, S. 202—211, kann dabei der zulässige Detektionsbereich für Echosignale in gewünschter Weise variiert werden. Auf diese Weise können auch Echos von Objekten mit unterschiedlichen Abständen zum Sensor erfaßt werden, indem das Auswertzeitfenster zyklisch über den Meßbereich verschoben wird, wobei die Auflösung der Einzelechos und die Gesamtmeßdauer mit geringerer Länge des Zeitfensters zunehmen.

Bekannt sind außerdem Verfahren zur Verarbeitung von Ultraschall-Echosignalen, bei denen das Empfangssignal digital abgetastet und in einem Speicher abgelegt wird, wobei das Empfangssignal auch die demodulierte Hüllkurve der Echos sein kann (EP 0 459 336). Die Signalverarbeitung erfolgt im Anschluß an die Aufzeichnung des Empfangssignals durch Extraktion der Echos mittels eines geeigneten Verfahrens, z. B. Matched Filter + Schwellwertdetektion. Auf diese Weise können alle innerhalb einer Messung auftretenden Echos detektiert werden.

Bekannt sind weiterhin Verfahren zur Unterdrückung von unerwünschten im Empfangssignal enthaltenen Echos, beispielsweise aufgrund störender Objekte, die sich zusätzlich zum Meßobjekt im Erfassungsbereich des Sensors befinden. Wenn die Störobjekte räumlich feststehen und gleichzeitig der Bewegungsbereich des Meßobjektes eingeschränkt ist, so kann eine hinreichende Unterdrückung von Störechos durch geeignete Wahl des Auswertzeitfensters erreicht werden.

Weiterhin ist bekannt, daß Störobjektechos dadurch unterdrückt werden können, daß in einer Einlernphase, bei der sich das Meßobjekt nicht im Erfassungsbereich des Sensors befindet, zunächst alle Störobjektechos detektiert und in einem Speicher abgelegt werden (DE 33 37 590). Während des Meßbetriebes werden die aktuell detektierten Echos mit den eingelernten Echos verglichen. Bei einer hinreichenden Übereinstimmung wird das Echo als Störobjektecho klassifiziert und entsprechend unterdrückt, während die übrigen Echos Meßobjekten zugeordnet werden.

In den Schriften DE 33 37 690 und EP 0 459 336 werden Verfahren beschrieben, welche durch Mehrfachreflexionen zwischen dem Sensor und einem Objekt verursachte Störechos dadurch ausblenden, daß die maximale auszuwertende Laufzeit begrenzt wird, so daß außerhalb dieser Laufzeit auftretende Echos ignoriert werden. Bei der in EP 0 459 336 dargestellten Lösung kann zusätzlich auch die Echoamplitude als Kriterium für die Mehrfachechounterdrückung ausgewertet werden. Für Meßsituationen mit mehreren Objekten im Erfassungsbereich des Sensors sind diese Verfahren jedoch i. a. ungeeignet.

Bekannt sind weiterhin Verfahren zur Unterdrückung von Störechos auf der Basis von Plausibilitätsprüfungen (DE 38 21 577). Da der Gradient, mit welchem sich die Meßsituation ändern kann, aufgrund der endlichen Bewegungsgeschwindigkeit von Objekten begrenzt ist, werden Echos nur dann ausgewertet, wenn ihre zeitliche Lage und Amplitude aufgrund vorheriger Meßsituationen hinreichend plausibel sind. Auf diese Weise können vor allem stochastisch auftretende Störsignale sicher unterdrückt werden.

Allen obenbekannten Verfahren zur Auswertung von Echosignalen bei Ultraschall-Abstandssensoren ist gemeinsam, daß jedem im Empfangssignal detektierten Echo, welches kein stochastisches Störsignal ist, innerhalb der maximal auszuwertenden Laufzeit ein Objekt zugeordnet wird, wobei sich der Abstand zum Sensor aus der Schalllaufzeit des Echos ergibt. Nachteilig an diesen bekannten Verfahren ist, daß somit auch Echos, welche beispielsweise durch mehrfache Reflexionen zwischen dem Sensor und einem einzigen Meßobjekt entstehen und die nicht außerhalb der maximalen auszuwertenden Laufzeit liegen, in fehlerhafter Weise weiteren, tatsächlich nicht vorhandenen Objekten zugeordnet werden. Dies kann zu sehr großen Fehlern bei der Beurteilung von Meßsituationen führen, insbesondere wenn sich Meßobjekte in geringem Abstand zum Sensor befinden.

Zwischen dem Schallwandler und den Objekten, die im Erfassungsbereich des Sensors liegen, kann das Schallsignal mehrmals reflektiert werden. In Abhängigkeit vom Abstand zwischen dem Objekt und dem Sensor, der Objektreflektivität und der Geometrie des Schallwandlers sowie der Ausbreitungsdämpfung klingen diese Mehrfachechos mehr oder weniger schnell ab. Bei einer ebenen Wandler- bzw. Reflektoroberfläche sowie bei einem geringen Abstand zwischen dem Wandler und dem Objekt liegt die Abklingzeitkonstante der Mehrfachechos in der Größenordnung der einfachen Schalllaufzeit. Diese ergibt sich aus dem Weg vom Sensor zum Objekt und zurück. Dadurch werden mehrere Echos desselben Objektes im Empfangssignal detektiert. Zusätzliche Störechos können auftreten, wenn sich mehrere Objekte im Erfassungsbereich des Sensors befinden. Ursache hierfür sind Reflexionswege zwischen den einzelnen Objekten bzw. Mehrfachreflexionen an verschiedenen Objekten.

Bei allen bekannten Verfahren zur Echosignalverarbeitung besteht das Problem, daß die durch Mehrfachreflexionen entstehenden Störechos dicht von den direkten Objektechos unterschieden werden, was bei vielen in der Praxis vorkommenden Situationen zu Fehlmessungen führt.

Die Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren anzugeben, welches die beschriebenen Störechos eliminiert.

Gelöst wird die Aufgabe durch ein Verfahren gemäß dem Patentanspruch 1.

Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind durch die in den Unteransprüchen 2 bis 6 angegebenen Merkmale gekennzeichnet. Die Verwendung des Verfahrens zur Füllstandsmessung ist Gegenstand des Anspruchs 7.

Die Erfindung ist vorteilhaft anwendbar für intelligente Abstandssensoren mit objektselektiven Meßeigenschaften, insbesondere für die Abstandsmessung unter durch störende Objekte erschwerten Bedingungen.

Im folgenden wird die Erfindung anhand von lediglich einen Ausführungsweg darstellenden Figuren der Zeichnung näher erläutert.

Fig. 1 zeigt das Prinzip des Puls-Echo-Verfahrens.

Fig. 2 zeigt die Entstehung von Mehrfachechos durch Reflexion des Schallsignals am Wandler oder zwischen den verschiedenen Objekten.

Fig. 3 zeigt Merkmale eines Einzelechos.

Fig. 4 zeigt das Prinzip der Mehrfachechoauswertung.

Fig. 5 zeigt die Echoprofilauswertung bei sich zeitlich änderndem Echoprofil z. B. aufgrund des Rührwerkes.

Fig. 6 zeigt die Echoprofilauswertung durch Vergleich mit dem gelernten Echoprofil (Teach-in-Profil).

Fig. 7 zeigt das Blockschaltbild einer möglichen Schaltungsanordnung für die Füllstandsmessung zur Echodetektion sowie zur Extraktion von Echomerkmalen. Ein Mikrocontroller übernimmt die Steuerung und die Auswertung der Messungen.

Die berührungslose Ultraschall-Abstandsmessung basiert auf der Bestimmung der Laufzeit eines Schallsignals von einem Schallwandler zum Meßobjekt und zurück (Impuls-Echo-Verfahren). Das Prinzip ist in Fig. 1 dargestellt. Das impulsförmige Sendesignal S wird periodisch ausgesandt, am Reflektor (Meßobjekt) reflektiert und steht am Ausgang des US-Wandlers um die Zeit t_e verzögert an. Zumeist wird nur das Hüllkurvensignal HK des hochfrequenten Empfangssignal ausgewertet. Der Meßbereich kann je nach gewählter Schallfrequenz von einigen mm bis zu mehreren 10 m betragen. Mit Ultraschall ist bei vergleichsweise geringem Aufwand eine hohe Wegaufösung in Richtung der Schallausbreitung erreichbar. Ein wesentlicher Vorteil besteht in Gegensatz zum optischen System in der weitgehenden Unempfindlichkeit gegenüber Staub und Beleuchtungsverhältnissen sowie gegenüber der Materialbeschaffenheit, Farbe und Oberflächenrauigkeit der Meßobjekte. Die Form und Amplitude der Echosignale können in starkem Maße von der Orientierung sowie der Geometrie eines Objektes abhängen. Ursache hierfür sind Abschattungen, spiegelnde Reflexionen sowie Interferenzen. Für die Abstandsmessung wirken sie als Störgrößen. Ein weiteres Problem besteht darin, daß bei gut reflektierenden Objekten infolge der Reflexion des Empfangssignals am Wandler häufig Mehrfachechos auftreten, welche das Vorhandensein weiterer Objekte vortäuschen (siehe Fig. 2). Dies ist immer dann kritisch, wenn vom Sensor nicht nur die kürzeste Objektdistanz gemessen werden soll.

Das Sendesignal S, das vom Ultraschallwandler USW ausgesandt wird, wird zuerst am Objekt O_a reflektiert. E_a stellt die Hüllkurve HK des ersten Nutzechos des Objekts O_a dar. Das zweite Echo $E_{a'}$ (erstes Mehrfachecho) trifft vor dem zweiten Nutzecho E_b , das vom Objekt b stammt, am Ultraschallwandler USW ein. $E_{a''}$ ist das zweite und $E_{a'''}$ das dritte Mehrfachecho des Objekts O_a . $E_{b'}$ ist das erste Mehrfachecho des Objekts O_b . $E_{ab'}$ ist das Echo, das aufgrund des parasitären Reflexionswegs zwischen den Objekten O_a und O_b zustande kommt.

Die Echos bzw. deren Hüllkurven sind mit folgenden Indizes versehen und die Laufzeiten setzen sich wie folgt zusammen:

Echo	Index	Laufzeit	Bedeutung
E_a	1	t_{e1}	Grundecho von Objekt a
$E_{a'}$	2	$t_{e2} = t_{e1} + t_{e1}$	erstes Mehrfachecho von Objekt a
E_b	3	t_{e3}	Grundecho von Objekt b
$E_{a''}$	4	$t_{e4} = t_{e1} + t_{e2}$	zweites Mehrfachecho von Objekt a
$E_{ab'}$	5	$t_{e5} = t_{e3} + (t_{e3} - t_{e1})$	Echo zwischen a und b
$E_{a'''}$	6	$t_{e6} = t_{e1} + t_{e4}$	drittes Mehrfachecho von Objekt a
$E_{b'}$	7	$t_{e7} = t_{e3} + t_{e3}$	erstes Mehrfachecho von Objekt b

Bei der Füllstandsmessung wirken häufig mehrere Störgrößen gleichzeitig. Das an der Oberfläche von Schüttgütern rückgestreute Echo besitzt im allgemeinen eine wesentlich geringere Amplitude als von Verstrebungen oder anderen konstruktiven Elementen oberhalb des Schüttgutes hervorgerufene Reflexionen bzw. Mehrfachechos. Hinzu kommen zeitweise Abschattungen durch Rührwerke sowie Ablagerungen an den Behälterwänden. Weitere Störeinflüsse sind durch Luftturbulenzen und Störschall gegeben, welche Amplitudenfluktuationen von mehr als 20 dB bewirken können.

Aufgabe der Signalverarbeitung ist es, das von der Füllgutoberfläche kommende Echo zuverlässig zu separieren. Da die Einhüllenden der einzelnen Echos im Empfangssignal nicht zwangsläufig signifikante Unterschiede aufweisen, ist eine einfache Erkennung anhand der Signalforn in der Praxis kaum möglich.

Die Separation von Nutz- und Störgrößen erfolgt deshalb mit einer Fuzzy-Auswerteeinheit. Als Eingangsgrößen wirken hierbei:

- Merkmale zur Charakterisierung eines Einzelechos
- Merkmale zur Beschreibung der Relationen zwischen mehreren Einzelechos

- Historie
- á priori-Wissen

Das á priori-Wissen ist stets situationsspezifisch. Im Falle der Füllstandsmessung gilt, daß das Füllgut dem am weitesten entfernt liegenden Echo, welches kein Mehrfachecho ist, zuzuordnen ist. Als á priori-Wissen kann auch die Kenntnis über die Lage der Festziele im Behälter (z. B. in Form eines Teach-in-Echoprofiles) sowie über die maximalen Befüll- und Entleerungsgeschwindigkeiten genutzt werden. Die Berücksichtigung der Historie ermöglicht Plausibilitätsprüfungen zur Unterdrückung von Fehlmessungen und Kompensation von Drifterscheinungen.

Das Echoprofil einer einzelnen Messung muß anhand signifikanter Kriterien (Fig. 3) bewertet werden. Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, daß das jeweilige Echo hinreichend gut durch folgende Merkmale beschrieben werden kann:

- zeitliche Lage des Maximums Laufzeit t_e
- Signalamplitude A_e des Maximums
- Formfaktor F_e (aus den 6dB Breiten des Maximums)

Zur Vereinfachung des Auswerteaufwands genügt eine Aufzeichnung der Hüllkurve. Sämtliche Merkmale zur Beschreibung der Relationen zwischen jeweils zwei Echos untereinander sind daraus abgeleitete Größen.

Jedes Mehrfachecho ist dadurch gekennzeichnet, daß es sich aus einem oder mehreren vorhergehenden Echos ableiten läßt. Aus diesen Vorechos, welche auch selbst Mehrfachechos sein können, lassen sich unter Berücksichtigung der räumlichen Divergenz des Schallsignals sowie der frequenzabhängigen Ausbreitungsdämpfung Erwartungswerte für die Merkmale eines Mehrfachechos bestimmen.

Ein Nutzecho, das zur Zeit t_e auftritt, besitzt üblicherweise ein Mehrfachecho 1. Ordnung zur Zeit $2t_e$, ein Mehrfachecho 2. Ordnung zur Zeit $3t_e$ usw. Für die erwartete Laufzeit t_e eines Mehrfachechos an der Stelle k gilt also (siehe hierzu auch Fig. 2):

$$t_{ek} = t_{ei} + t_{ej} \quad (1 \leq i \leq k, 1 \leq j \leq k)$$

i, j, k : Echoindex; ein höherer Index entspricht einer größeren Laufzeit
 $i = j$: erstes Mehrfachecho des Objektes an der Stelle i .

Zusätzliche Mehrfachechos können durch Reflexionswege zwischen mehreren Einzelobjekten hervorgerufen werden. Im einfachsten Fall (dünne Platten als Reflektoren) gilt dann:

$$t_{ek} = t_{ej} + (t_{ej} - t_{ei}) \quad (i \neq j; 1 \leq i, j < k)$$

Die Amplitude eines Signals erlaubt Aussagen über die auftretenden Verluste. Sie nimmt mindestens mit dem Faktor $1/r$ ab. Dabei stellt r den Abstand zum US-Wandler dar. Hinzu kommt noch eine Dämpfung α von etwa 0,015 dB/λ. Diese Abnahme kann jedoch noch wesentlich größer sein und hängt insbesondere von den auftretenden Reflexionsfaktoren ab. Hinsichtlich der Amplitude A_e eines Mehrfachechos an der Stelle k , vgl. Fig. 2 E_a, E_a', E_a'', E_a''' welches sich aus den Vorechos i und j zusammensetzt, muß somit aufgrund der Divergenz des Schallstrahles ($A_e \sim 1/t_e$) und der Ausbreitungsdämpfung folgende Bedingung erfüllt sein, sofern keine Reflexionswege zwischen den verschiedenen Objekten beitragen:

$$A_{ek} \cdot t_{ek} < \min \{ (A_{ei} \cdot t_{ei}); (A_{ej} \cdot t_{ej}) \} \quad (i, j < k)$$

Für Mehrfachechos infolge eines Reflexionsweges zwischen zwei Objekten i und j gilt zumindest:

$$A_{ek} \cdot t_{ek} < \max \{ (A_{ei} \cdot t_{ei}); (A_{ej} \cdot t_{ej}) \} \quad (i, j < k)$$

Die Signalform eines Echos kann durch unterschiedliche Parameter wie z. B. Anstiegs und/oder Abklingzeit oder das Verhältnis von Amplitude zu Breite charakterisiert werden. Für die Praxis erscheint ein aus mehreren Signalformparametern abgeleiteter Formfaktor F_e als zweckmäßig. Für das im Rahmen dieser Erfindung entwickelte Auswerteverfahren wurde der Formfaktor aus der Einhüllenden wie folgt bestimmt (siehe Fig. 3):

$$F_e = (B_a / 6\text{dB}) \setminus (B_e / 6\text{dB})$$

wobei B_a die Zeit ist, die zwischen dem Erreichen des Amplitudenmaximums A_e und dem links davon liegenden 6dB Abfall verstreicht. B_e ist die Zeit, die verstreicht, bis das Signal vom Amplitudenmaximum A_e bis zum rechts davon liegenden 6dB Abfall abgeklungen ist.

Bei Reflexionen an ebenen oder einfachen regelmäßig gekrümmten Flächen bleibt die Signalform im wesentlichen erhalten. In diesen Fällen besitzen Mehrfachechos eine ähnliche Einhüllende wie die zugehörigen Vorechos i und j :

$$F_{ek} \approx F_{ei} F_{ej}$$

Das Verfahren zur Klassifizierung eines Echos als Nutz- oder Mehrfachecho beruht darauf, daß die Merkmale

jedes detektierten Echos mit den aus den Vorechos berechneten Erwartungswerten verglichen werden. Hierfür erweisen sich normierte Merkmalsdifferenzen als besonders geeignet.

$$D_{Mm} = (M_{meßm} - M_{erwm}) / M_{erwm}$$

$M_{meß}$: gemessenes Merkmal m , wobei das Merkmal m t_e , A_e oder F_e sein kann.

M_{erw} : Erwartungswert des Merkmals m .

D_{Mm} : skalierte Merkmalsdifferenz.

Im konkreten Fall bedeuten kleine Differenzen, daß das betreffende Echo mit höherer Wahrscheinlichkeit der Klasse "Mehrfachecho" zuzuordnen ist. Wegen der oben aufgeführten Einflußfaktoren auf die Schallausbreitung stellen die Erwartungswerte M_{erw} stets nur Schätzwerte dar. Eine binäre Ja/Nein-Entscheidung bei der Mehrfachechobewertung ist somit kaum sinnvoll. Daher werden die Differenzwerte D_{Mj} als Eingangsgrößen für die Fuzzy-Auswerteeinheit verwendet. Fig. 4a illustriert anhand einer Meßsituation und des zugehörigen Echoprofiles das Verfahren am Beispiel zweier Teilechos (E_a und E_b). Als Ergebnis der Defuzzifizierung wird jedem Teilecho ein Wert zugeordnet, welcher die Mehrfachecho-Wahrscheinlichkeit P_{MFE} beschreibt (Fig. 4b). Die Ordinate trägt hier die Wahrscheinlichkeit für ein Nutzecho P_{NEO} , welche das Komplement zur Mehrfachecho-wahrscheinlichkeit P_{MFE} ist. In Fig. 4a bedeutet kl kleine Differenz, mt mittlere, gr große, n-gr negativ große und p-gr positiv große, s-gr sehr große, m-kl mittelkleine und m-gr mittelgroße Differenz, sowie s-gr sehr große Differenz.

Da die Bewegungsgeschwindigkeit von Objekten im Erfassungsbereich des Sensors stets begrenzt ist, kann sich das Echoprofil von einem zum anderen Meßzyklus nicht sprunghaft ändern. Dieses Wissen wird üblicherweise zur Plausibilitätsbewertung einzelner Echos genutzt. Da andererseits die Geschwindigkeit der Situationsänderung nur selten exakt bekannt ist und Echos aufgrund von Luftbewegungen oder zeitweisen Abschattungen stark fluktuieren können, erweisen sich Verfahren mit festen Schwellenwerten als nur bedingt geeignet.

Bei dem hier vorgestellten Füllstandsensor erfolgt eine Plausibilitätsprüfung mit Hilfe von Fuzzy-Regeln. Dabei wird jedes Einzelecho der aktuellen Messung mit den Echos des vorhergehenden Meßzyklus verglichen. Eine "gute" Übereinstimmung liegt dann vor, wenn sowohl die Laufzeitdifferenz als auch die Differenz der Mehrfachecho-Wahrscheinlichkeiten P_{MFE} "klein" sind. Die Absolutwerte für "kleine", "mittlere" und "große" Laufzeitdifferenzen ergeben sich beispielsweise aus maximaler Befüllgeschwindigkeit und Meßrate. Je nach Güte der Übereinstimmung mit einem Echo der vorhergehenden Messung wird der Wert für die Nutzecho-Wahrscheinlichkeit $P_{NEO} = 1 - P_{MFE}$ der aktuellen Echos mit einem aus der Defuzzifizierung abgeleiteten Wichtungsfaktor multipliziert. Bei plötzlich verschwindenden Echos (z. B. Verdeckung durch Rührwerk) wird das aktuelle Profil durch das entsprechende Echo aus der vorhergehenden Messung mit verringerter Wichtung ergänzt. Damit enthält die jeweils letzte Messung das gewichtete akkumulierte Ergebnis aus mehreren vorhergehenden Meßzyklen. In Fig. 5 ist das Verfahren schematisch dargestellt.

Ein Grundproblem bei der Ultraschall-Abstandsmessung gleichzeitig zu mehreren Objekten ist dadurch gegeben, daß echte Objektechos durch Mehrfach- oder andere Störreflexionen überdeckt werden können. Bei der Füllstandsmessung besteht die Aufgabe darin, das vom Füllgut reflektierte Schallsignal sicher zu detektieren, wobei dessen Amplitude sehr klein gegenüber den Festzielechos sein kann. Das erfindungsgemäße Verfahren wendet zusätzlich das Prinzip des Vergleichs zwischen dem in einer Einlernphase abgespeicherten Festziel-Echoprofil (einschließlich Rührwerke, welche sich periodisch im Erfassungsbereich des Sensors befinden) und dem im eigentlichen Meßbetrieb aufgenommenen Signalverlauf an. Dieser Vergleich wird im folgenden im Gegensatz zu herkömmlichen Füllstandssensoren ebenfalls mit Hilfe von Fuzzy-Regeln durchgeführt. Echos mit "guter" Übereinstimmung werden Festzielen zugeordnet und für die weitere Verarbeitung mit geringer Wichtung bewertet. Von den übrigen Echos wird das mit der größten Laufzeit, welches eine geringe Mehrfachecho-Wahrscheinlichkeit besitzt, dem Füllgut zugeordnet. Für den Fall, daß alle detektierten Echos mit dem eingelernten Verlauf hinreichend gut übereinstimmen (z. B. wenn sich das Füllgut in Höhe eines Festzieles befindet), wird das letzte Echo mit hoher Nutzecho-Wahrscheinlichkeit ausgewertet. Die Bewertung der Abweichungen zwischen eingelerntem und gemessenem Echoprofil wird analog, wie vorher beschrieben, durchgeführt. Das Verfahren ist in Fig. 6a-e illustriert. Vorteile der unscharfen Auswertung sind in der Kompensation von Driften und der damit möglichen adaptiven Nachführung des Teach-in-Verlaufes zu sehen.

Bei ungünstigen Reflexionsbedingungen an der Oberfläche eines Schüttgutes kann das eigentlich interessierende Füllstandsecho zeitweise bereits im Bereich der Rauschgrenze des Meßsystems liegen. In diesem Fall ist die Detektion des Nutzechos über mehrere Meßzyklen oft nur sporadisch möglich. Eine weitere Fehlerursache können Störechos bilden, welche durch parasitäre Reflexionswege zwischen dem Schüttgut und konstruktiven Elementen des Behälters entstehen, wie in Fig. 6c gezeigt. Da diese Echos später als das Füllstandsecho am Schallempfänger eintreffen, können sie von der Auswertung fehlinterpretiert werden.

Zur Unterdrückung fehlerhafter Meßwertausgaben wird daher neben der im vorigen beschriebenen Fluktuationsbewertung eine zusätzliche Plausibilitätsprüfung des Meßergebnisses durchgeführt. Diese verwendet als Eingangsgrößen die Meßwerte mit der höchsten Nutzecho-Wahrscheinlichkeit ($P_{NE\max}$) aus den letzten n Messungen sowie dem aktuell angezeigten Wert. Der Anzeigewert wird immer dann aktualisiert, wenn der neue Meßwert innerhalb der durch die maximale Befüll- bzw. Entleergeschwindigkeit vorgegebenen Toleranzzone liegt, wobei zur Glättung des Anzeigeverlaufes eine gleitende Mittelwertbildung durchgeführt wird. Im anderen Fall wird der Anzeigewert erst dann überschrieben, wenn alle Meßwerte der letzten n Zyklen innerhalb dieser Toleranzzone liegen und der zu den Echos mit der nächst höheren Nutzecho-Wahrscheinlichkeit über einer vorgegebenen Schwelle liegt. Wenn die Meßwerte unzulässig streuen, bleibt der jeweils letzte gültige Anzeigewert erhalten. Dieser Zustand wird zugleich durch ein Fehlerflag über die Anzeige signalisiert. Die Plausibilitäts-

prüfung des Anzeigewertes kann ebenfalls mit Hilfe von Fuzzy-Reglern erfolgen.

Die Konzeption des vorgestellten Auswerteverfahrens erlaubt die schrittweise Erprobung der einzelnen Module. Anhand von Testsituationen mit mehreren Reflektoren können die Fuzzy-Sets für die Bewertung von Mehrfachechos, zeitlichen Fluktuationen und Übereinstimmung mit dem Teach-in-Profil einzeln erstellt und optimiert werden.

Bild 7 zeigt den für die Füllstandsmessung realisierten Aufbau und ein Blockschaltbild der Auswerteeinheit.

Durch den Mikrocontroller MC wird in vorgegebenen Zeitabständen ein Sendeimpuls generiert, welcher über die Sendeendstufe SE an den Schallwandler USW geführt wird. Das abgestrahlte Schallsignal gelangt nach der Reflexion an den Objekten O_a , O_b , O_c als Echoprofil EP zurück zum Schallwandler USW. Nach Durchlaufen des Vorverstärkers/Hüllkurvendemodulators V erhält man die demodulierten Echos. Sobald im Empfangssignal ein vorgegebener Schwellwert überschritten wird, liefert ein Komparator ein entsprechendes Ausgangssignal, dessen Vorderflanke den Peakdetektor zur Messung der Echoamplitude sowie einen Integrator zur Bestimmung der Breite des Echos (Formfaktor) aktiviert. Wenn die maximale Echoamplitude erreicht ist, generiert der Peakdetektor ein Steuersignal, mit welchem der Inhalt der zur Luftzeitmessung verwendeten Zähler-/Speicherbaugruppe in den Zwischenspeicher übernommen wird. Mit der Rückflanke des Komparatorsignals werden die einzelnen Merkmale t_e , A_e , F_e an die Fuzzyauswertung zur Echobewertung übergeben.

Die Fuzzyauswertung übernimmt die Mehrfachechobewertung mit der Vergabe einer Mehrfachechowahrscheinlichkeit P_{neo} , die Fluktuationsbewertung mit der Vergabe einer Fluktuationswahrscheinlichkeit P_{ne} , den Vergleich mit den eingelernten Echos (Teach-in) mit der Vergabe einer Wahrscheinlichkeit P_{fuell} , und die Plausibilitätsüberprüfung mit der Vergabe einer Plausibilitätswahrscheinlichkeit P_{meB} . Die Mehrfachechobewertung und die Fluktuationsbewertung beschränken sich in ihrer Anwendung nicht nur auf die Füllstandsmessung. Wo hingegen der Vergleich mit Eingelerntem und die Plausibilitätsprüfung füllstandsmeßspezifisch sind.

Alternativ kann der komplette Empfangssignalverlauf bzw. die demodulierte Hüllkurve mittels einer ADC-Baugruppe abgetastet und zwischengespeichert werden. Neben der Echobewertung erfolgt dann auch die Merkmalsextraktion durch entsprechende Software.

Die Untersuchungen zur Wichtung der Echomerkmale für die Mehrfachechoerkennung ergaben, daß die Laufzeit die größte Aussagekraft besitzt. Die Echoamplitude kann vor allem dann von Bedeutung sein, wenn Mehrfach- und Nutzecho zusammenfallen. Der Formfaktor besitzt das geringste Gewicht. Er trägt bei sich überlappenden Echos mit ähnlicher Amplitude zur verbesserten Bewertung von Mehrfachechos bei.

Gegenüber herkömmlichen Verfahren weist der beschriebene Fuzzy-Vergleich zwischen Teach-in-Echoprofil und Meßsignal wesentliche Vorteile auf, beispielsweise wenn vom Schüttgut selbst Mehrfachreflexionen erzeugt werden.

Das zunächst für Ultraschallsensoren beschriebene erfindungsgemäße Auswerteverfahren kann auch vorteilhaft auf berührungslos arbeitende Meßsysteme, welche auf der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen beruhen, angewendet werden. Hierzu zählen beispielsweise Puls-Radar-Anordnungen zur Objektortung in größeren Entfernungen oder Mikrowellensensoren für die Abstandsmessung. Die Bewertung der Echoamplituden kann an die im jeweiligen Ausbreitungsmedium wirkende Dämpfung durch á priori Wissen optimal angepaßt werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Erkennung und Separation von Nutz- und Störechos im Empfangssignal von Abstandssensoren, welche nach dem Impuls-Echo-Prinzip arbeiten,

1.1 bei dem die Maxima im Empfangssignal detektiert werden und jedem Maximum ein Echo zugeordnet wird,

1.2 bei dem Formfaktoren, die die Form der Echos charakterisieren, gebildet und gespeichert werden,

1.3 bei dem die Amplituden und die Zeitpunkte des Auftretens der maxima gemessen und gespeichert werden,

1.4 bei dem die Unterschiede zwischen den gemessenen Amplitudenwerten und Erwartungswerten der Amplituden bestimmt werden,

1.5 bei dem die Unterschiede zwischen den gemessenen Zeitpunkten des Auftretens der Maxima und Erwartungswerten der Zeitpunkte des Auftretens der Maxima bestimmt werden,

1.6 bei dem die Unterschiede zwischen den unter Schritt 1.2 bestimmten Formfaktoren und Erwartungswerten der Formfaktoren bestimmt werden,

1.7 bei dem die Wahrscheinlichkeit für ein Mehrfachecho als um so größer angenommen wird, je kleiner die Unterschiede, die in den Schritten 1.4, 1.5 und 1.6 bestimmt wurden, sind,

1.8 bei dem die Wahrscheinlichkeit für ein Störecho als um so größer angenommen wird, je größer die Wahrscheinlichkeit für ein Mehrfachecho ist.

2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem zur Bestimmung des Formfaktors die Breite des Echos und die Breite des Echos bis zum Maximum zueinander ins Verhältnis gesetzt werden.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, bei dem die Wahrscheinlichkeit für ein Mehrfachecho mittels Fuzzy-Logik bestimmt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 1, 2 oder 3, bei dem die Wahrscheinlichkeit für ein Störecho mittels Fuzzy-Logik bestimmt wird.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1—4, bei dem der Erwartungswert der Amplitude eines Maximums mittels der Proportionalität:

$$\text{Erwartungswert der Amplitude} \approx \frac{1}{\text{Signallaufzeit}}$$

bestimmt wird, bei der die Signallaufzeit die Zeit ist, die vom Aussenden eines Signals bis zum Empfangen des reflektierten Signals vergeht.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1—5, bei dem der Erwartungswert des Formfaktors für das auszuwertende Echo einer der Formfaktoren der vorhergehenden Echos ist.

7. Verwendung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1—6, zur Füllstandsmessung.

Hierzu 7 Seite(n) Zeichnungen

FIG 1

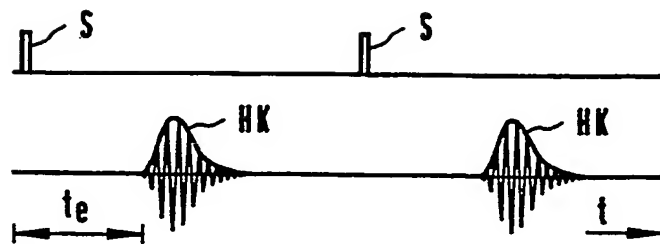


FIG 2

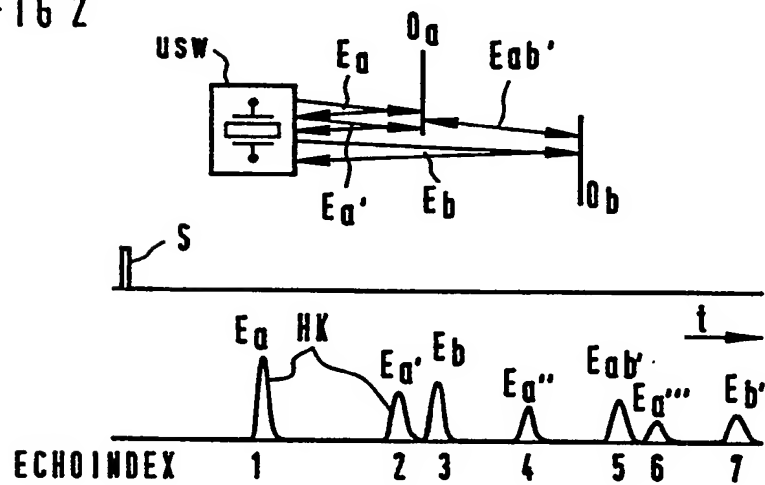
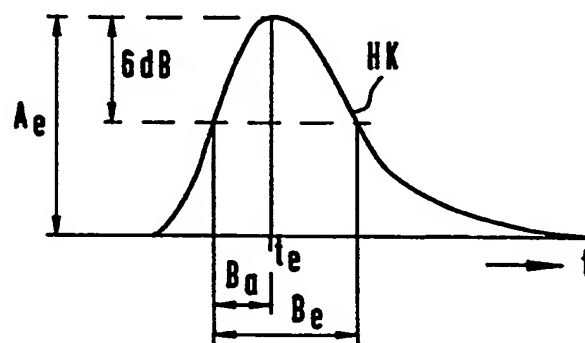


FIG 3



F16 4a

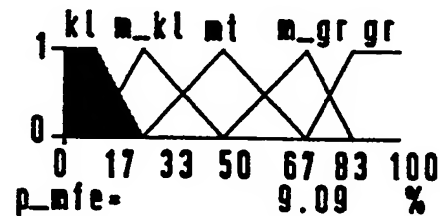
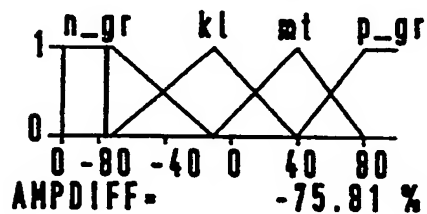
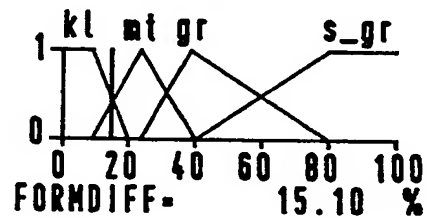
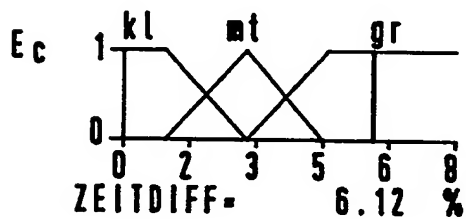
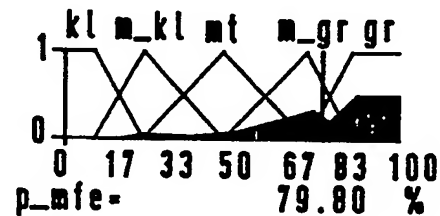
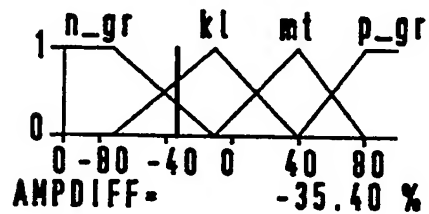
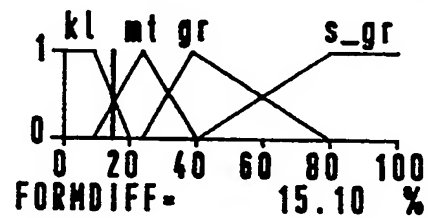
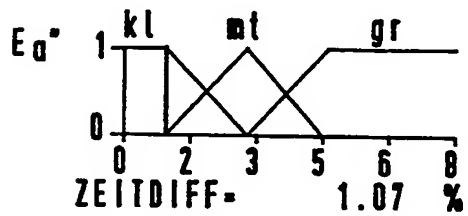
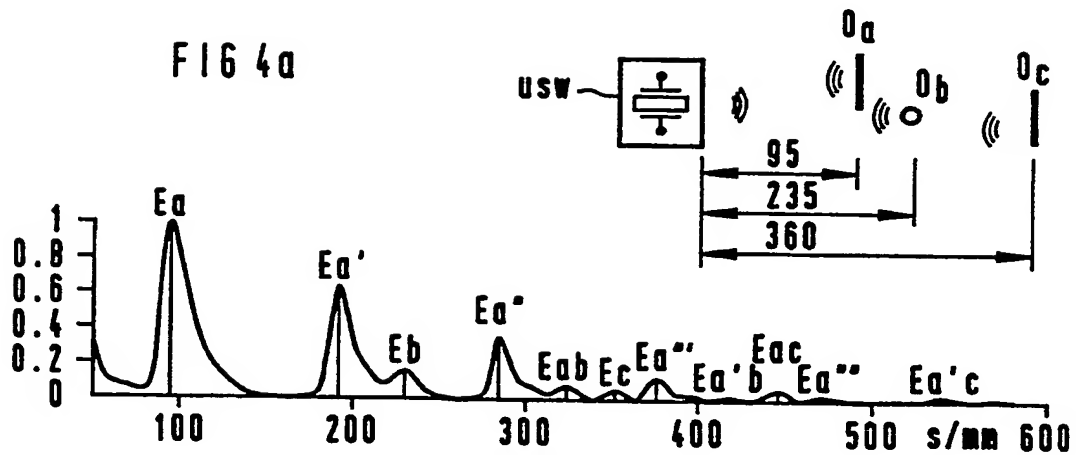
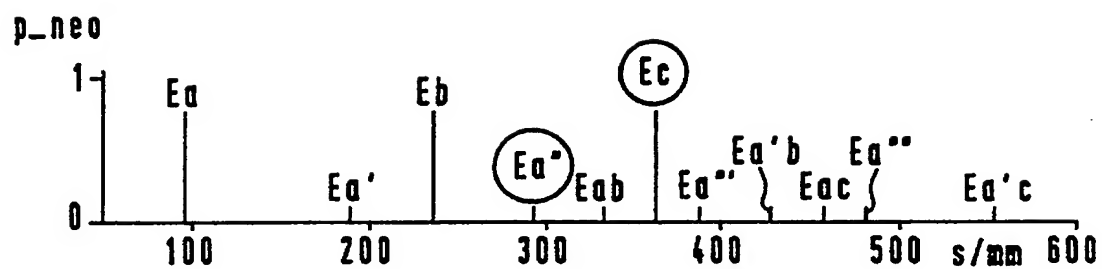
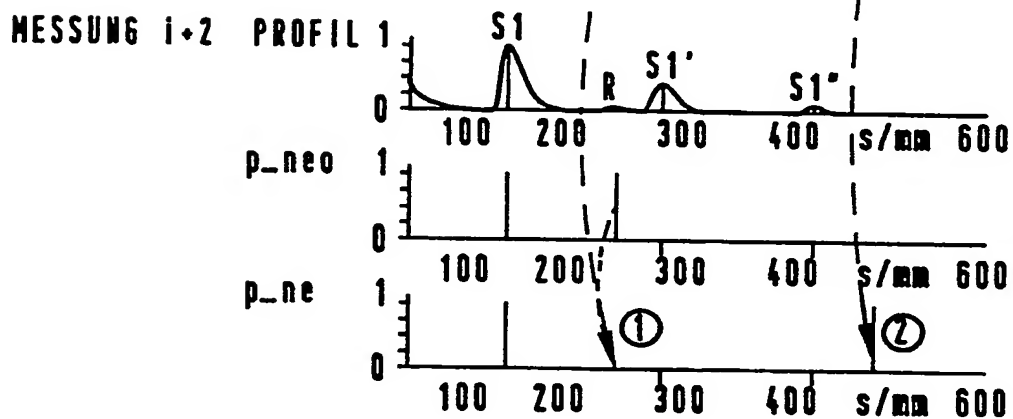
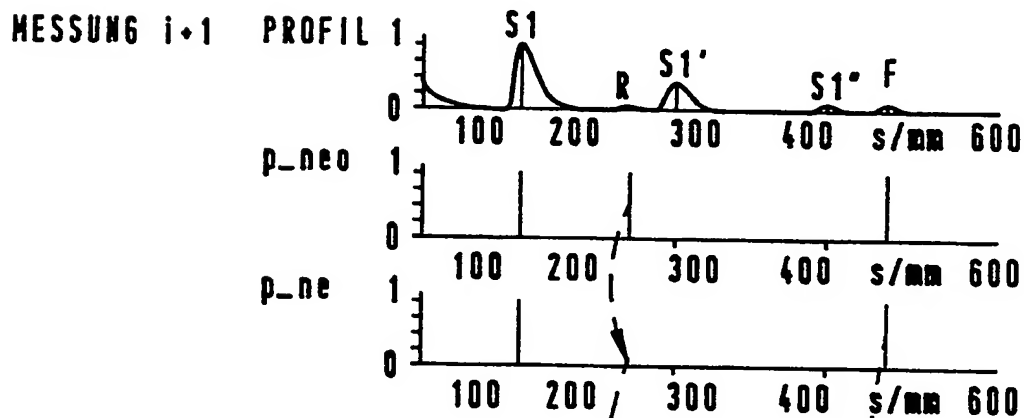
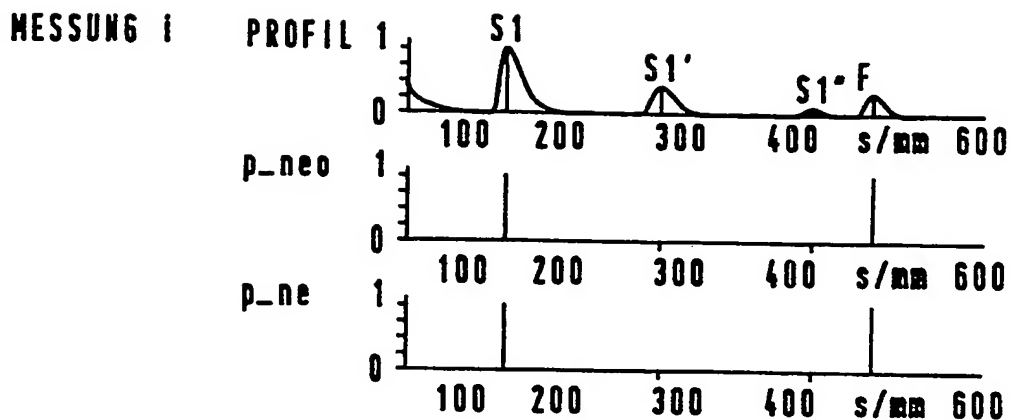


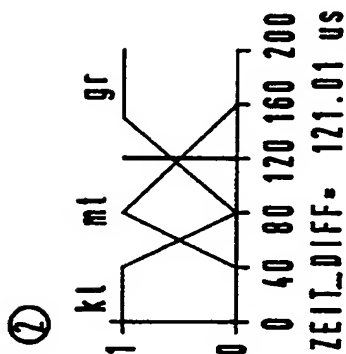
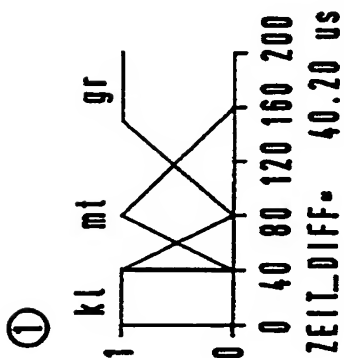
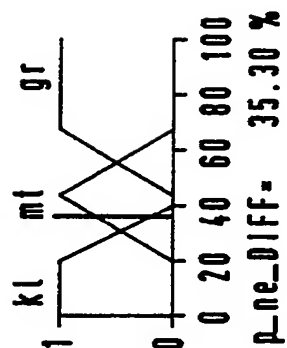
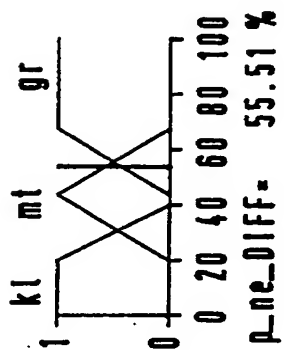
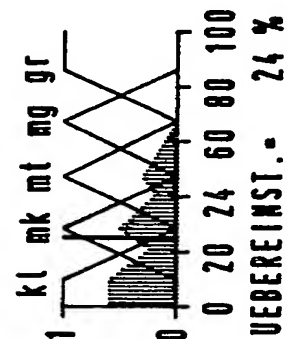
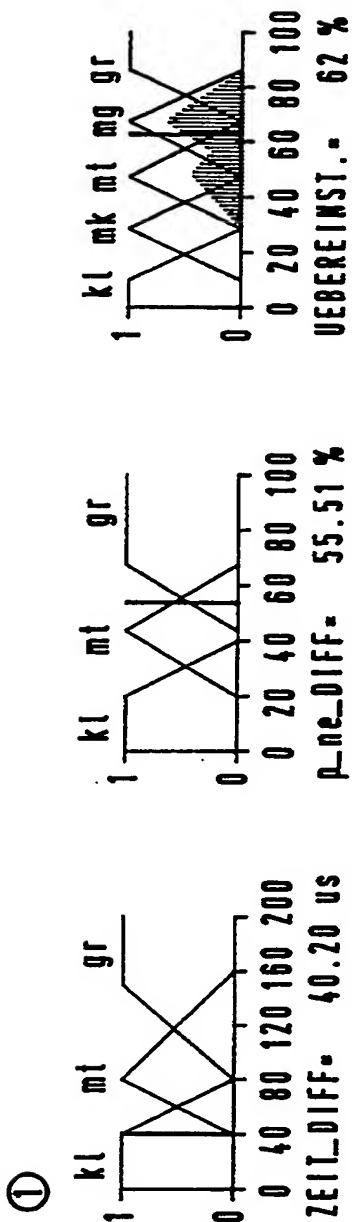
FIG 4b



F16 5a



F16 5b



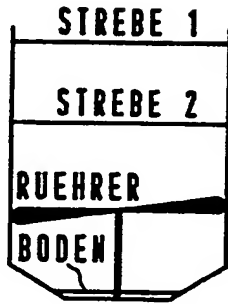


FIG 6a

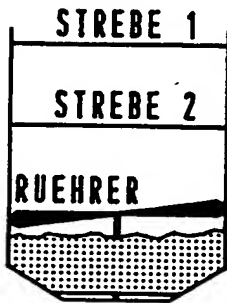
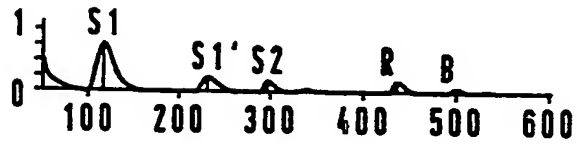


FIG 6b

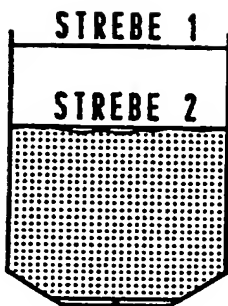
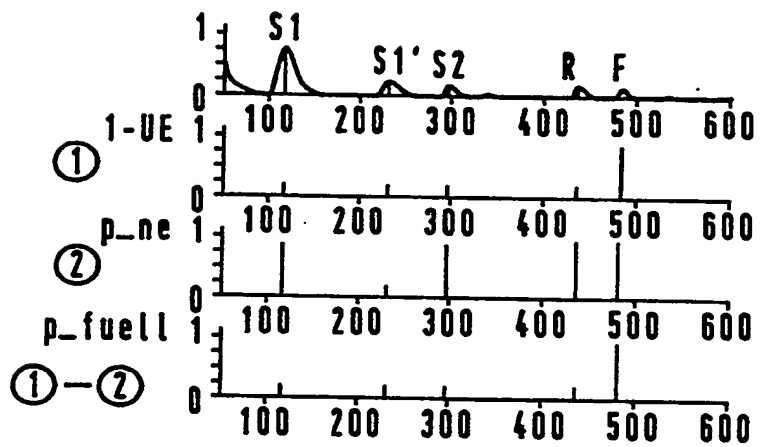


FIG 6c

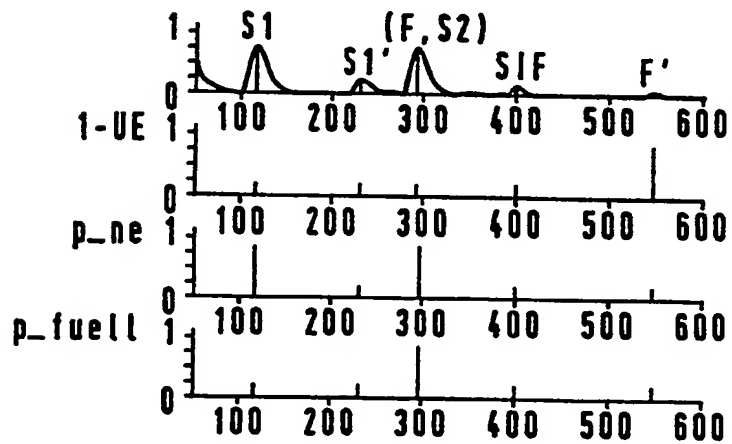


FIG 7

